

**IDENTIFICACION DE LAS PRESIONES ACTUANTES EN SOSTENIMIENTO DE TUNELES A PARTIR DE LAS MEDIDAS DE CONVERGENCIA**

Montans Leal, F.J.(%); Alarcón Alvarez, E.(\*)<sup>1</sup>; Huerta, M<sup>a</sup> C.(%)  
(%) Sociedad de Investigación, Estudios y Experimentación (SINEX).  
Modesto Lafuente,41. 28003-Madrid. Tfn (91) 5349102. FAX (91) 5348715  
(\*) Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.  
José Gutierrez Abascal, 2. 28006-Madrid. Tfn (91) 5626200. FAX (91) 5618618

**Resumen.-** En este artículo se muestra una metodología y unas expresiones para el análisis del sostenimiento en túneles construidos mediante el Nuevo Método Austriaco (NTAM). Este método está basado en medidas muy robustas debido a su exactitud y de fácil obtención.

**Abstract.-** This article shows a methodology and an expresions to the analysis of tunnel support build whith the New Tunneling Austrian Method. This Method is based on hard meansures because of their accurate and easy reading.

**1. INTRODUCCION**

Tradicionalmente, la construcción de túneles ha sido un tipo de obra sobredimensionado y de definición "sobre la marcha", en las que el sostenimiento absorbía prácticamente todo el trabajo estructural de la obra. Con la aparición del Nuevo Método Austriaco (NATM) en la construcción de túneles, ha surgido la consideración de un nuevo "sistema" constituido por dos subestructuras: Terreno y Sostenimiento. Se aprovecha de esta forma la capacidad del terreno para "autoabsorberse" descargando sobre el sostenimiento presiones mucho menores pero exigiendo un mayor seguimiento del comportamiento y deformaciones del conjunto.

De dicho seguimiento, y en pos de un conocimiento de las presiones, tensiones y niveles de seguridad existentes y de su evolución temporal, han surgido los distintos estudios que se expresan a continuación, realizados sobre los túneles de El Padrún (Autovía Oviedo-Mieres-Campomanes).

**2. DATOS UTILIZADOS**

Han sido realizadas diversas mediciones a lo largo del túnel que han proporcionado entre otros los siguientes datos:

- \* CONVERGENCIAS AA, BB, CC, DD, NN (Fig. 2.1)
- \* GEOLÓGIA
- \* INDICES RMR Y RQD
- \* PRESIONES DE INTERFASE
- \* TENSIONES EN EL HORMIGON

De todas las mediciones, han sido las convergencias, debido a la mayor exactitud de su instrumentación, estudio de su evolución, fiabilidad y fácil detección de errores las que han gozado de mayor consideración.

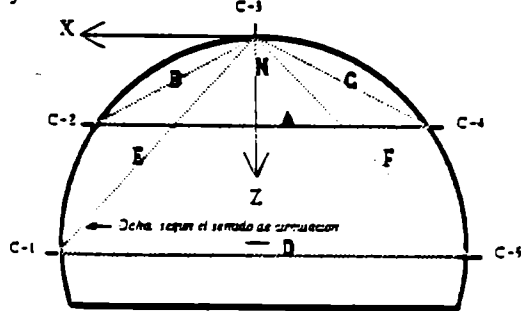


Figura 2.1

**3. MODELOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS DEL SOSTENIMIENTO**  
**3.1 MODELOS PREVIOS**

En principio han sido estudiados diversos modelos para reproducir el comportamiento del sostenimiento, cuyos resultados no han sido compatibles con las deformaciones medidas. En la figura 3.1.1. se muestran los más significativos.

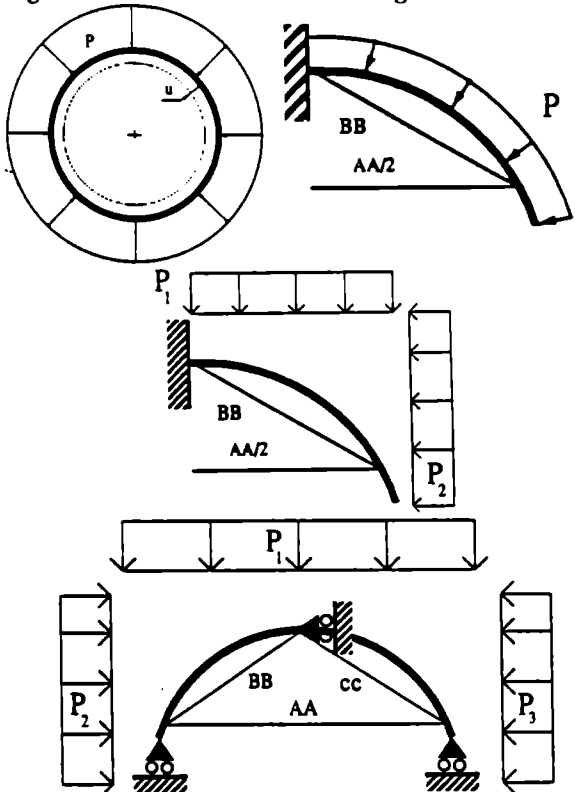


Figura 3.1.1

Posteriormente se han realizado modelos de elementos finitos con distintas condiciones de contorno y siguiendo dos procesos de análisis:

- Proceso Directo
- Proceso Inverso.

El primero consistió en someter el arco discretizado con diversas condiciones de contorno a una presión típica (10 Kg/cm²) y observar las convergencias que se medirían; resultando incompatibles con las existentes en el túnel.

En todo caso, el modelo con apoyos tangenciales resultó ser el que suministraba convergencias más próximas a aquéllas.

El segundo proceso de análisis consistió en intentar obtener un modelo de deformación del arco a partir de las convergencias medidas para posteriormente obtener las presiones y tensiones actuantes compatibles con tales deformaciones. El menor conocimiento del movimiento absoluto de la excavación y la necesidad de efectuar hipótesis adicionales para poder determinar el movimiento de los puntos de anclaje, junto con la dificultad para encontrar una función de interpolación adecuada, ha hecho que se barajaran distintos modelos. Los valores y, sobre todo, las distribuciones de presiones y tensiones que tales modelos proporcionaban no resultaron convincentes a la vista de los valores suministrados por las células de presión. En la figura 3.1.2 se muestran las distintas condiciones de contorno y funciones de interpolación utilizadas.

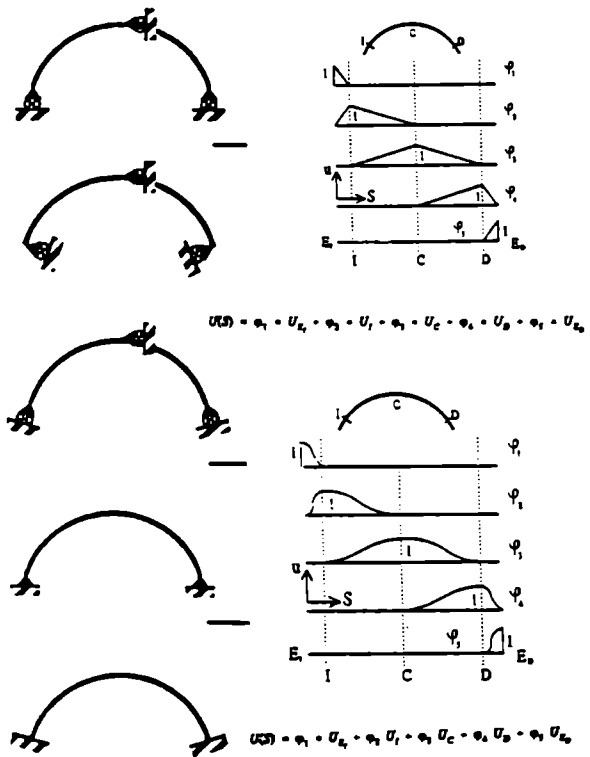


Figura 3.1.2

### 3.2 MODELO DEFINITIVO

De los modelos anteriores, se dedujo que las condiciones de contorno válidas eran las de apoyo tangencial. Por otro lado, dado que la experiencia existente apunta a distribuciones de presiones de interfase casi uniformes, se ha optado por incluir la no uniformidad de dichas distribuciones a través de pequeñas variaciones en el ángulo de apoyo.

Se han considerado geometrías recogidas a través de medidores láser para cada sección y geometrías idealizadas de arco, con radio igual al de la sección; resultando recomendable el uso de las segundas.

En este modelo el proceso de análisis consistió en buscar aquella presión y ángulos en los apoyos que deformasen el arco de una forma compatible con las convergencias medidas. Para ello se recurrió a procesos de optimización consistentes en la búsqueda iterativa del mínimo de una función objetivo para distintos valores de unas variables denominadas variables de estado. Las funciones objetivo ensayadas perseguían una deformada que diese como convergencias las medidas en la sección considerada.

En avance, entre otras, se han considerado como funciones objetivo: (AA,BB,CC convergencias calculadas con los actuales valores de las variables y AM,BM,CM, convergencias medidas en la sección):

1.- Energía de deformación

2.

$$\sqrt{(AA - AM)^2 + (BB - BM)^2 + (CC - CM)^2}$$

3.

$$\sqrt{[(AA - AM) 10^4]^2 + [(BB - BM) 10^4]^2 + [(CC - CM) 10^4]^2} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_p} =$$

$$\alpha = 1 \div 100$$

4.

$$\sqrt{[(AA - AM) 10^4]^2 + [(BB - BM) 10^4]^2 + [(CC - CM) 10^4]^2} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_p} =$$

$$+ 10^3 [\arctg(1) - \arctg(AA 10^4)] + 10^3 [\arctg(1) - \arctg(BB 10^4)] + 10^3 [\arctg(1) - \arctg(CC 10^4)]$$

Con

$$\begin{aligned} AAC &= |AA - AM| \\ BBC &= |BB - BM| \\ CCC &= |CC - CM| \end{aligned}$$

como variables de estado y:

$$\sqrt{\left[ \frac{AA - AM}{AM} 10^4 \right]^2 + \left[ \frac{BB - BM}{BM} 10^4 \right]^2 + \left[ \frac{CC - CM}{CM} 10^4 \right]^2}$$

Con las anteriores variables de estado y:

$$G_1 = \left| \frac{AA - AM}{AM} \right| - \left| \frac{BB - BM}{BM} \right|$$

$$G_2 = \left| \frac{AA - AM}{AM} \right| - \left| \frac{CC - CM}{CM} \right|$$

$$G_3 = \left| \frac{BB - BM}{BM} \right| - \left| \frac{CC - CM}{CM} \right|$$

Puesto que ha sido esta última función la que ha proporcionado resultados óptimos en todos los casos, para el estudio de la destroza se ha empleado la función

$$f = \sqrt{\left(\frac{AA-AM}{AM}\right)^2 + \left(\frac{DD-DM}{DM}\right)^2}$$

y con las variables de estado:

$$\left| \frac{AA-AM}{AM} \right| - \left| \frac{DD-DM}{DM} \right|$$

siendo esta vez DN1 = DN2 = DN

De los modelos estudiados en este apartado brotan las siguientes conclusiones:

a) Tanto la presión de interfase radial como la tensión en el hormigón dependen de:

- El valor de las convergencias
- La relación entre las mismas.

Para una misma relación entre convergencias (AA/BB, BB/CC en avance y AA/DD en destroza). La presión varía linealmente con la magnitud de las convergencias; sin embargo, la relación (cociente) entre la misma marca en gran medida las presiones de interfase existentes. De hecho, definidos BB y CC, un aumento de la convergencia AA hace disminuir la presión de interfase. Esto ocurre gracias a que al aumentar AA, un mayor porcentaje de las convergencias BB y CC se deberá a la flexión del arco (que se consigue con una ligera modificación de la distribución de presiones sin necesidad de aumentar la presión media).

En la figura 3.2.3 se muestra una relación aproximada de la presión de interfase radial existente en un sostenimiento de R = 5,6 m y espesor constante de 15 cm. Estas figuras se pueden expresar del siguiente modo:

Utilizando los modelos de sostenimiento descritos, si se tiene un arco de espesor e sometido a una presión p, con unos ángulos de apoyo del mismo sobre el tangencial DN1 = 0, DN2 = 0; en las proximidades de estos valores, las convergencias para un presión p, ángulos de apoyo DN1 y DN2 y espesor e, serán aproximadamente:

$$AA = \frac{p}{p^*} \left( \frac{e^*}{e} \right) \left[ AA^* + \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN1} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN1 + \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN2} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN2 \right]$$

$$BB = \frac{p}{p^*} \left( \frac{e^*}{e} \right) \left[ BB^* + \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN1} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN1 + \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN2} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN2 \right]$$

$$CC = \frac{p}{p^*} \left( \frac{e^*}{e} \right) \left[ CC^* + \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN1} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN1 + \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN2} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN2 \right]$$

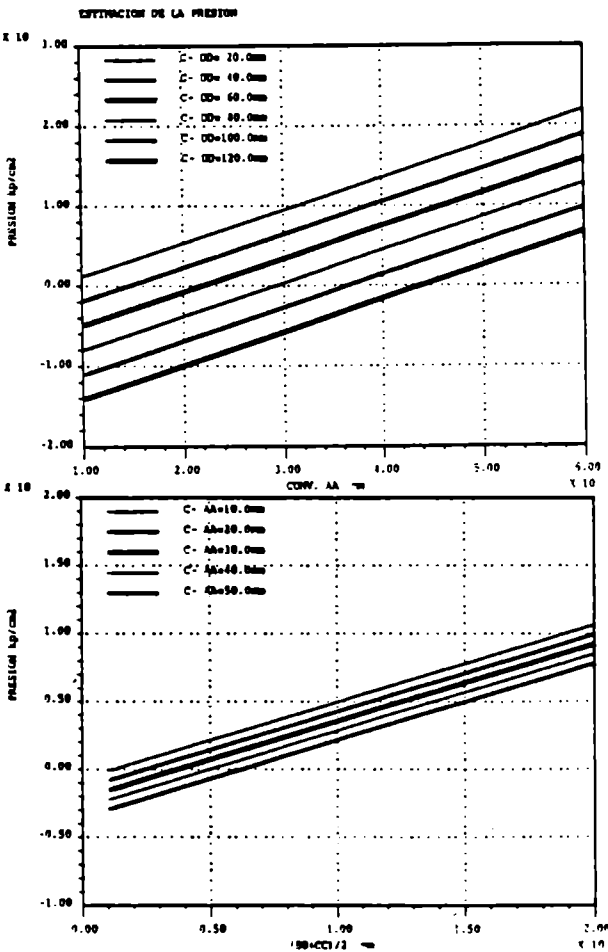


Figura 3.2.3

para un espesor e = e\* las relaciones anteriores son más exactas y se muestran más simples; y tomando p\*=1Kp/cm²:

$$AA = p \left[ AA^* + \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN1} \right]^* DN1 + \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN2} \right]^* DN2 \right]$$

$$BB = p \left[ BB^* + \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN1} \right]^* DN1 + \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN2} \right]^* DN2 \right]$$

$$CC = p \left[ CC^* + \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN1} \right]^* DN1 + \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN2} \right]^* DN2 \right]$$

La solución de tal sistema para unas convergencias AA, BB y CC proporciona los ángulos y presiones necesarios:

$$DN2 = \frac{\begin{vmatrix} CC^* & AA^* \\ CC & AA \end{vmatrix} \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN1} \right]^* \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN1} \right]^*}{\begin{vmatrix} \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN1} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN1} \right]^* \\ \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN2} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN2} \right]^* \end{vmatrix} \begin{vmatrix} BB^* & AA^* \\ BB & AA \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN1} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN1} \right]^* \\ \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN2} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN2} \right]^* \end{vmatrix} \begin{vmatrix} AA^* & BB^* \\ AA & BB \end{vmatrix}}$$

$$DN1 = \frac{\begin{vmatrix} BB^* & AA^* \\ BB & AA \end{vmatrix} \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN2} \right]^* \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN2} \right]^*}{\begin{vmatrix} \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN1} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN1} \right]^* \\ \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN2} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN2} \right]^* \end{vmatrix} \begin{vmatrix} BB^* & AA^* \\ BB & AA \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN1} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN1} \right]^* \\ \left[ \frac{\partial BB}{\partial DN2} \right]^* & \left[ \frac{\partial CC}{\partial DN2} \right]^* \end{vmatrix} \begin{vmatrix} AA^* & BB^* \\ AA & BB \end{vmatrix}}$$

$$p = \frac{AA}{AA^* + \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN1} \right]^* DN1 + \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN2} \right]^* DN2}$$

Expresiones que pueden extenderse para cada espesor y módulo de elasticidad, o hacer la siguiente aproximación:

$$\dot{p} = p \frac{\dot{e}}{e} \frac{\dot{E}}{E}$$

$$DN1 = DN1 \left( \frac{\dot{e}}{e} \right)^2$$

$$DN2 = DN2 \left( \frac{\dot{e}}{e} \right)^2$$

Por otro lado, la tensión en el hormigón se puede aproximar empíricamente para distintos espesores y radios:

$$\sigma = \alpha \frac{R^*}{e^*} \dot{p} \frac{e^*}{e} \left( \frac{\dot{R}}{R^*} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\sigma = \alpha \frac{R^*}{e^*} p$$

donde

$$\alpha \frac{R^*}{e^*} = 36$$

para

$$R^* = 5,6 \text{ m} \quad y \quad e^* = 15 \text{ cm}$$

De forma análoga, para la destroza:

$$AA = \frac{p}{p^*} \left( \frac{e^*}{e} \right) \left[ AA^* + \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN \right]$$

$$DD = \frac{p}{p^*} \left( \frac{e^*}{e} \right) \left[ DD^* + \left[ \frac{\partial DD}{\partial DN} \right]^* \left( \frac{e^*}{e} \right)^2 DN \right]$$

$$p = \frac{\left[ \frac{\partial DD}{\partial DN} \right]^* AA - \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN} \right]^* DD}{\left[ \frac{\partial DD}{\partial N} \right]^* AA^* - \left[ \frac{\partial AA}{\partial DN} \right]^* DD^*} \quad DN = \frac{AA - AA^* p}{\left[ \frac{\partial AA}{\partial DN} \right]^* p}$$

y para otros radios, espesores y módulos de elasticidad:

$$\dot{p} = p \frac{\dot{e}}{e} \left( \frac{R^*}{\dot{R}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\dot{E}}{E^*}$$

La tensión en el hormigón:

$$\sigma = \frac{R^*}{e^*} \alpha p$$

Expresiones que han sido obtenidas de los procesos de optimización. Teóricamente, para un tubo:

$$\sigma = \frac{R}{e} p$$

siendo para  $R = 5,6 \text{ m}$   $e = 15 \text{ cm}$

$$\frac{R}{e} = 37,3 > 36$$

debido a la flexión existente.

Además, también en el comportamiento de tubo:

$$\dot{p} = \left( \frac{R^*}{\dot{R}} \right)^2 p$$

el subíndice 3/2 en lugar de 2 se debe a resultados experimentales, siendo más adecuado.

### 3.3 SEPARACION DEL COMPORTAMIENTO A FLEXION DEL COMPORTAMIENTO TIPO TUBO

Para el túnel en cuestión, una vez determinada la presión, puede aproximarse el desplazamiento radial medio (aproximadamente el desplazamiento de un tubo bajo esa presión) como:

$$U_r = p \frac{R^2}{Ee}$$

y las convergencias tipo tubo, siempre que  $AA^*$ ,  $BB^*$  y  $CC^*$  hayan sido calculadas con  $DN1 = 0$  y  $DN2 = 0$ :

$$AA^a = AA^* p = U_r \frac{A}{R}$$

$$BB^a = BB^* p = U_r \frac{B}{R}$$

$$CC^a = CC^* p = U_r \frac{C}{R}$$

$$DD^a = DD^* p = U_r \frac{D}{R}$$

siendo A,B,C,D la longitud de las cuerdas donde se miden, respectivamente, las convergencias AA, BB, CC, DD.

Las convergencias producto del comportamiento a flexión serán:

$$AA^f = AA - AA^a = AA - AA^* p$$

$$BB^f = BB - BB^a = BB - BB^* p$$

$$CC^f = CC - CC^a = CC - CC^* p$$

$$DD^f = DD - DD^a = DD - DD^* p$$

Puede comprobarse que

$$\begin{aligned}
 p(AA^*, BB^*, CC^*) &= p(AA, BB, CC) \\
 DNI(AA^*, BB^*, CC^*) - DN2(AA^*, BB^*, CC^*) &= 0 \\
 p(AA', BB', CC') &= 0 \\
 DN1(AA', BB', CC') &> DN1(AA, BB, CC) \\
 DN2(AA', BB', CC') &> DN2(AA, BB, CC)
 \end{aligned}$$

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se han expuesto unas expresiones prácticas para la identificación de presiones radiales de interfase y de las tensiones en el hormigón del sostenimiento de túneles. Los datos básicos de partida son las convergencias medidas (o ajustadas) del sostenimiento. Sobre estos datos es preciso hacer las siguientes consideraciones: el sostenimiento de avance soportará, hasta la inclusión de la destroza, la convergencia AA ajustada. En el caso de que haya sido necesario el regunitado, el rebulonado o cualquier otra modificación de la rigidez, se deben separar las convergencias medidas hasta la fecha de tal operación de las ocurridas posteriormente, analizándolas por separado y sumando posteriormente las presiones y tensiones de ambas fases.

Con esta consideración el método se basa en datos muy robustos cuya evolución es conocida por lo que es sencillo detectar cualquier error en los mismos.